

# ICSC 2017

CAE for virtual product  
CAE for innovation  
CAE for process transformation

## IDAJ CAE Solution Conference

# 优化技术在电机发展中的应用

IDAJ株式会社

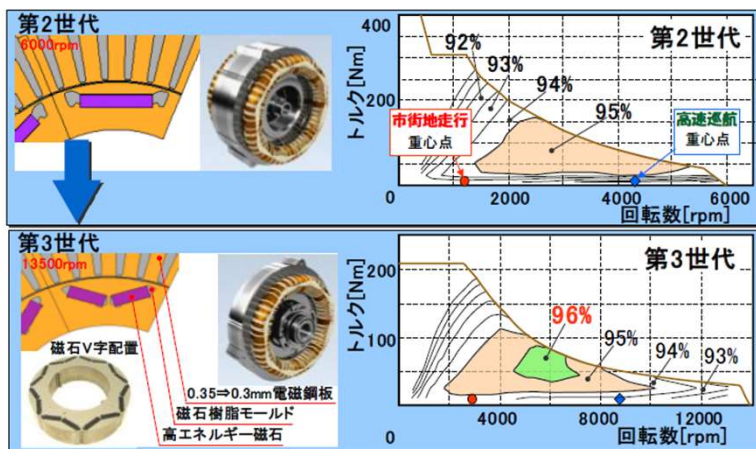
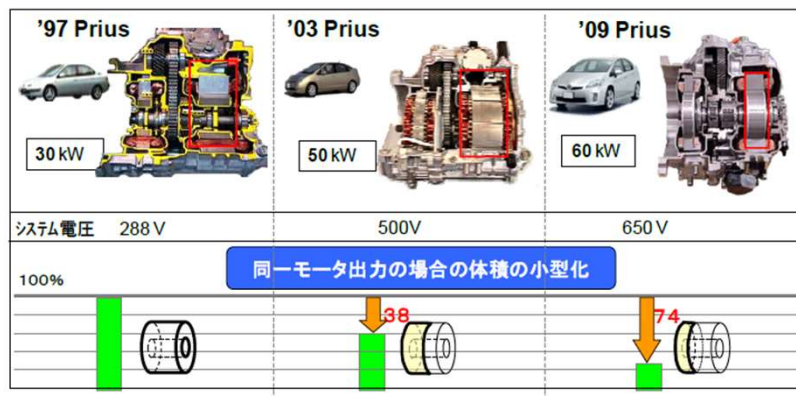
分析技术三部 富谷 典生

## 发表内容

- 日本的电机开发案例
- 电机形状优化的磁场分析技术应用
  - 电机设计要求
  - 各种电机设计的分析
  - 其他的电机分析技术
- 电机形状的全局优化过程
  - 概要
  - 输入约束条件
  - 初始样本空间
  - 优化实施前的准备
  - 优化计算实施
  - 后处理

# 日本的驱动电机开发

## 丰田普锐斯案例

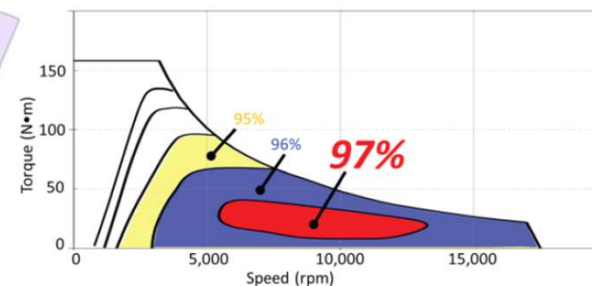
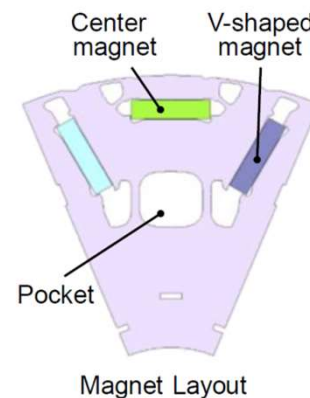
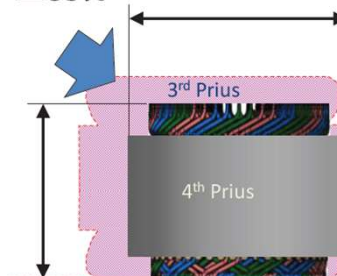


现在电机尺寸约为20年的1 / 5  
形状更复杂、效率更高

⇒ 电机优化需求的提高

第4世代

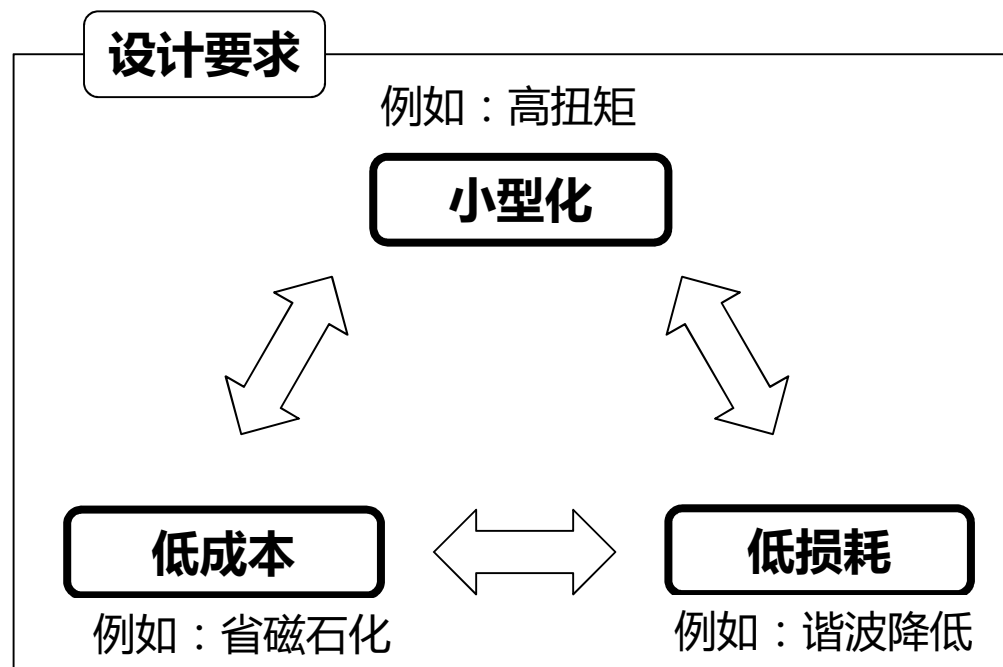
▲35%



# 电机形状优化的磁场分析技术

# 电机设计要求

本质上是权衡设计



约束条件

离心力强度  
(应力)

磁石  
不可逆减磁

热

NVH

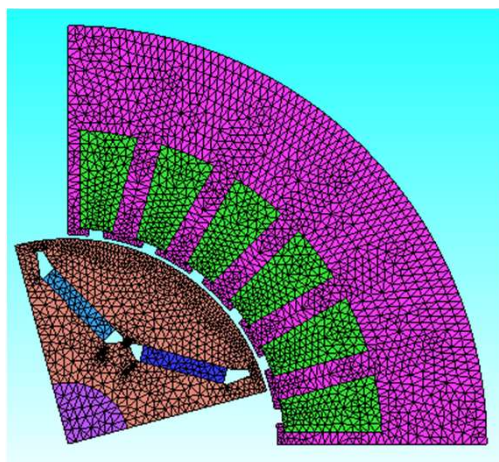
针对目标应用

在满足约束条件的同时，通过了设计要求的折中方案

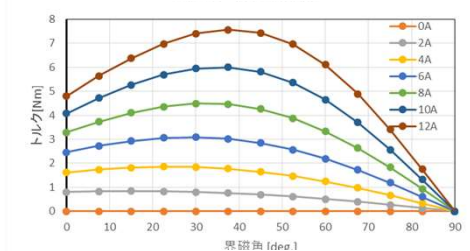
⇒ 典型的多目的优化问题

# 各种电机设计的分析

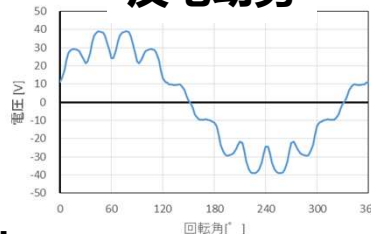
## 基本性能（T【扭矩】-N【转速】特性）



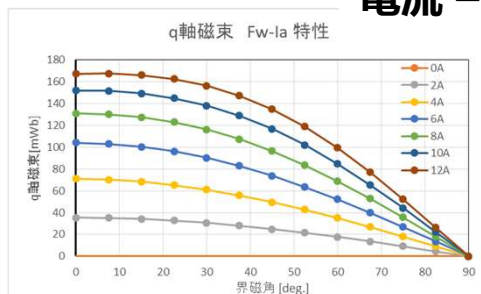
### 电流 - 扭矩特性



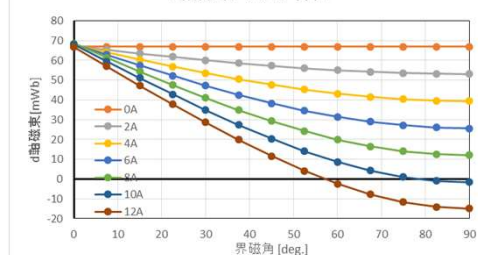
### 反电动势



### 电流 - 磁通特性



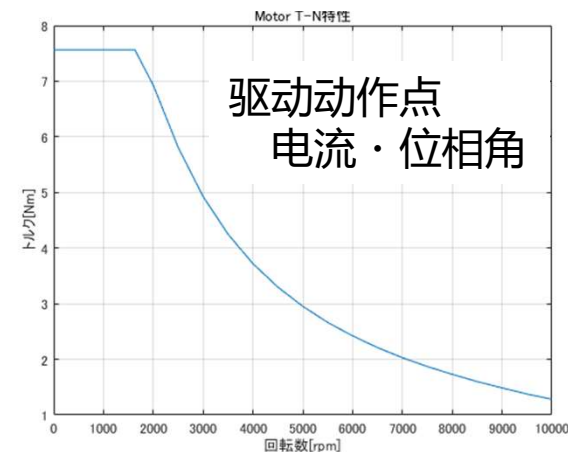
### d轴磁束 Fw-Ia 特性



電流 - 扭矩 / 磁通特性  
⇒ T-N特性（后处理）

↓  
高速・自动计算  
优化实施的必要条件

### T - N特性



驱动动作点  
电流・位相角

## 各种电机设计的分析

### 损耗分析

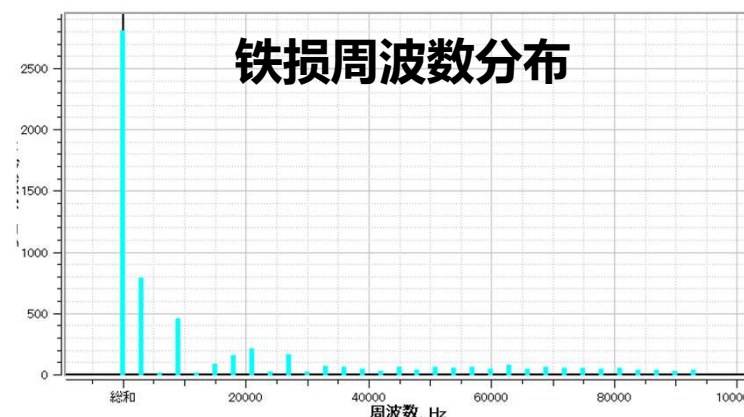
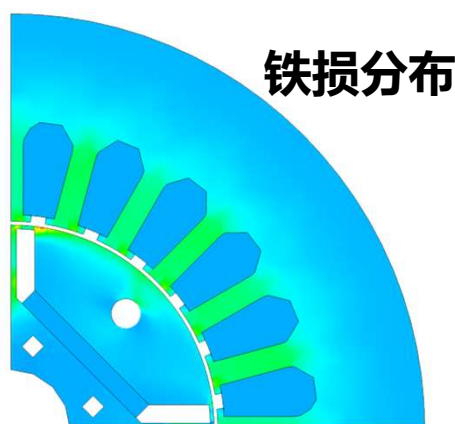
- 电磁钢板的铁损
- 磁钢的涡流损耗
- 线圈的涡流损失

### 其他分析

- 磁铁的不可逆减磁
- 离心力强度
- 热
- 噪声 · 振动是分析的难点

## 各种电机设计的分析

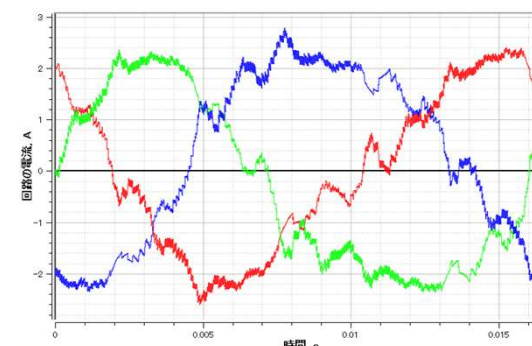
### ■ 电磁钢板铁损分析 优化必须的约束条件



- 为了提高精度，应该用pwm电流波形进行分析
  - 需要pwm控制模拟
  - 分析非常耗时
- 铁损分析时间要比扭矩分析时间长

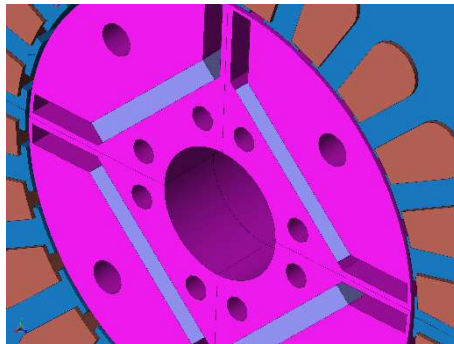
有时需要制定措施缩短计算时间

### PWM电流波形



## 各种电机设计的分析

### ■ 磁钢涡流分析



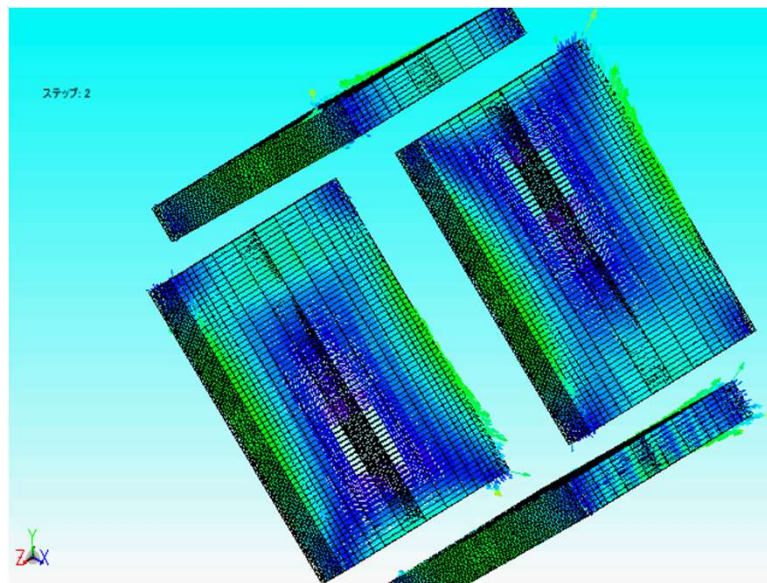
【目的】  
①损耗高精度化

磁钢不可逆退磁

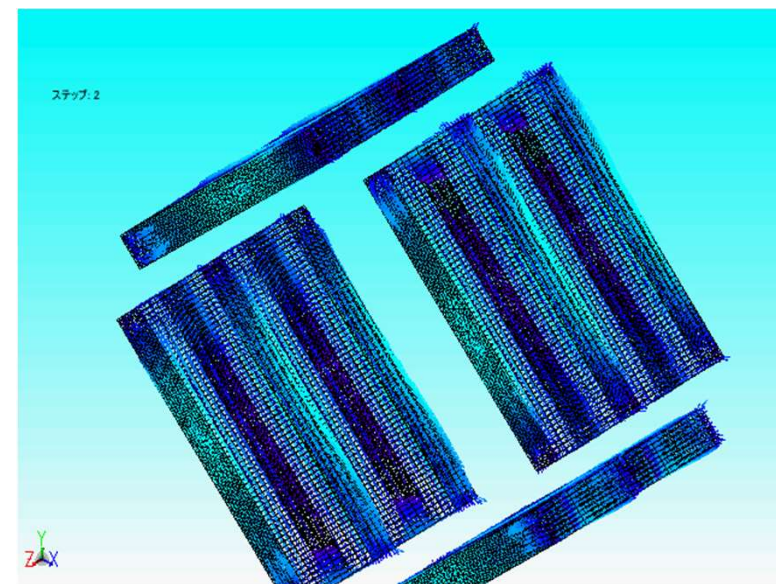
→ 热分析的集成

【约束条件的明确】

用磁钢分割(轴方向)来降低磁钢的发热量

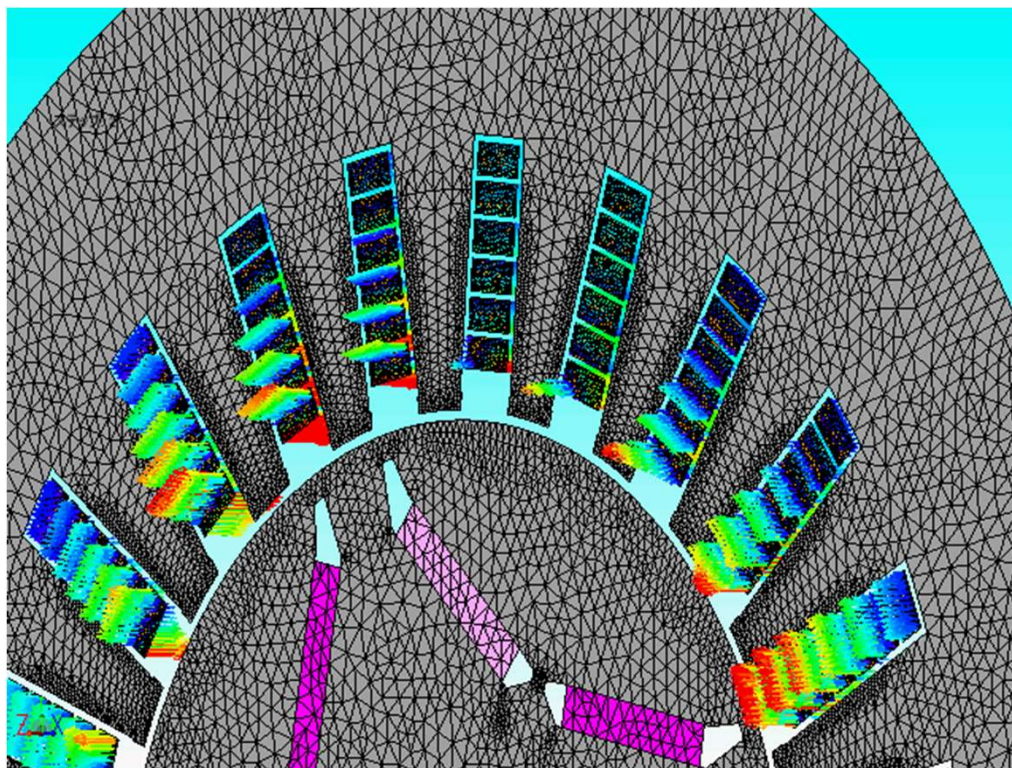


1/2  
分割



## 各种电机设计的分析

### ■ 线圈涡流分析



采用矩形线圈铜线

【目的】

缩短端部尺寸达到减少铜损的效果

【任务】

在矩形铜线中产生涡流

【对策】

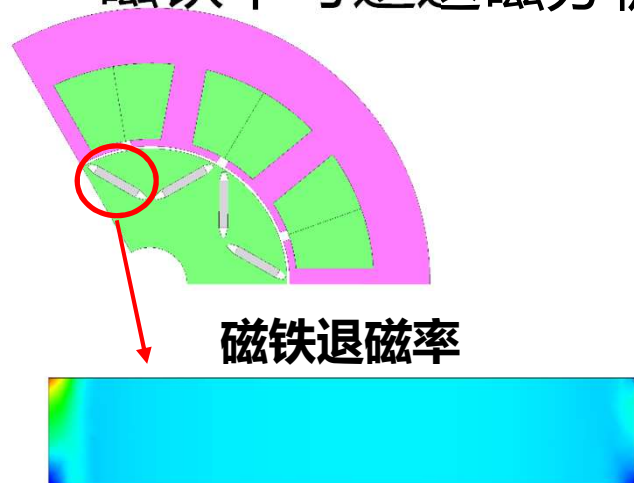
改善定子和转子的形状

减少涡流

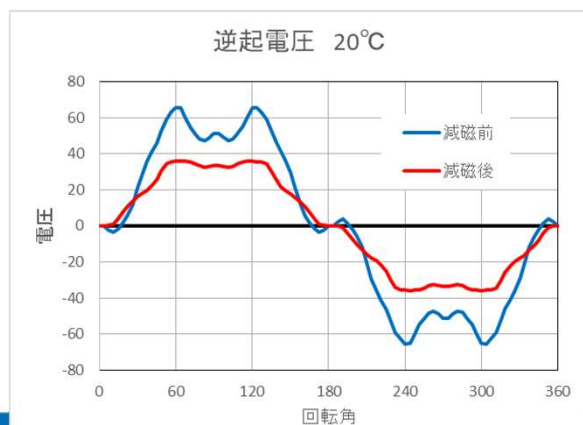
⇒ 启用形状优化

## 各种电机设计的分析

### ■ 磁铁不可逆退磁分析



退磁前后反电动势



PM电机的情況

**优化时必要的约束条件**

在实际设计中，必须明确以下条件  
**意想不到的问题**

#### ① 磁钢工作温度的保证

⇒ 根据冷却等条件估算最大磁钢温度  
假设是必要的

#### ② 退磁分析条件的定义

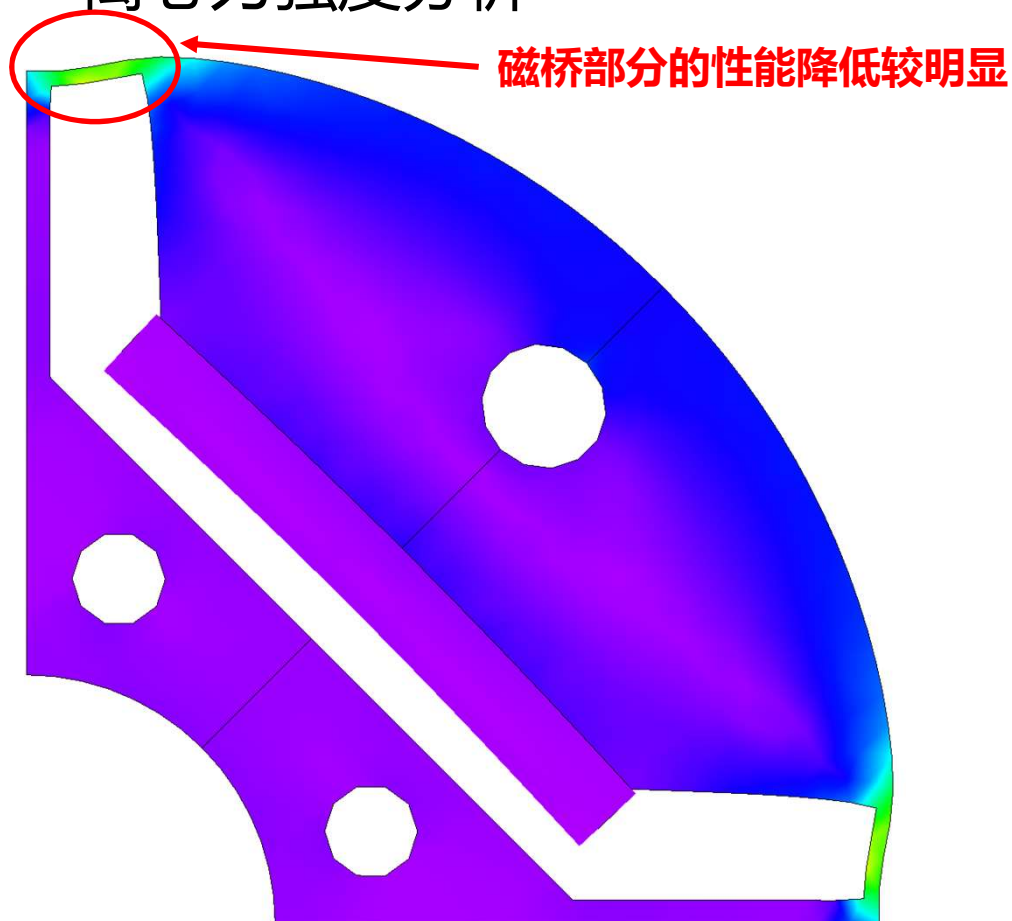
⇒ 在操作过程中产生退磁的最严重因素  
明确是什么状态

#### ③ 退磁判断条件的明确

⇒ 退磁是用各元件的磁钢退磁率来表示的  
设定数值的判断条件

## 各种电机设计的分析

### ■ 离心力强度分析



由漏磁导致的扭力下降



离心力强度

为了保证性能，需要与磁场  
分析耦合



优化时必要的约束条件

## 各种电机设计的分析

### 不适于形成详细的电机磁场分析与优化

#### ■ 热

- 比如定子是水冷，通过热流体耦合分析进行管理 . . .  
在许多情况下需要三维分析，所以分析时间需要很充裕
- 像磁铁冷却等油冷的情况，分析的精度很难保证  
有很多时候是空气和油的两相流分析  
如果从实际模型的实际测量中求出热电阻，就可以用JMAG分析  
在预试验分析中很难保证准确性

#### ■ NVH（ 噪声 · 振动 ）

根据以下的要求，在分析中很难找到固定值

- 层叠钢板 ⇒ 焊接, 铆接
- 线圈 ⇒ 浸漆

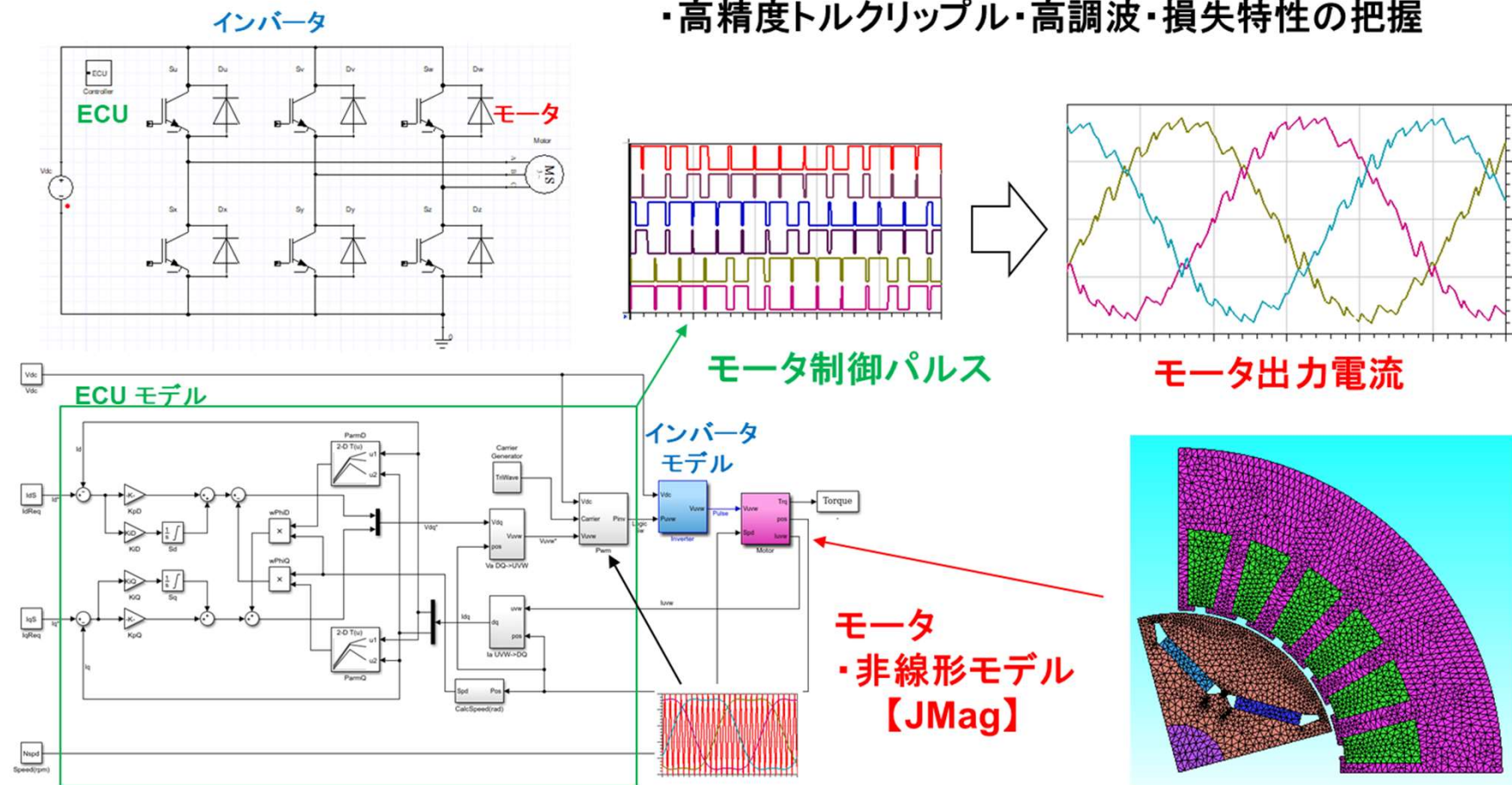
在实际测量中，将磁场分析的电磁力映射到结构分析上  
可以更精确地分析

# 其他的电机分析技术

## ■ MBD非线性电机模型

- JMAG-RT 无法对应的情况下，需要建立自己的模型
- 通过Simulink定制化提高开关速度

・高精度トルクリップル・高調波・損失特性の把握



# 广义的电机形状优化

## 优化实施时的课题

为了实现像右图像这样的  
电机的形状优化  
有必要解决以下的课题

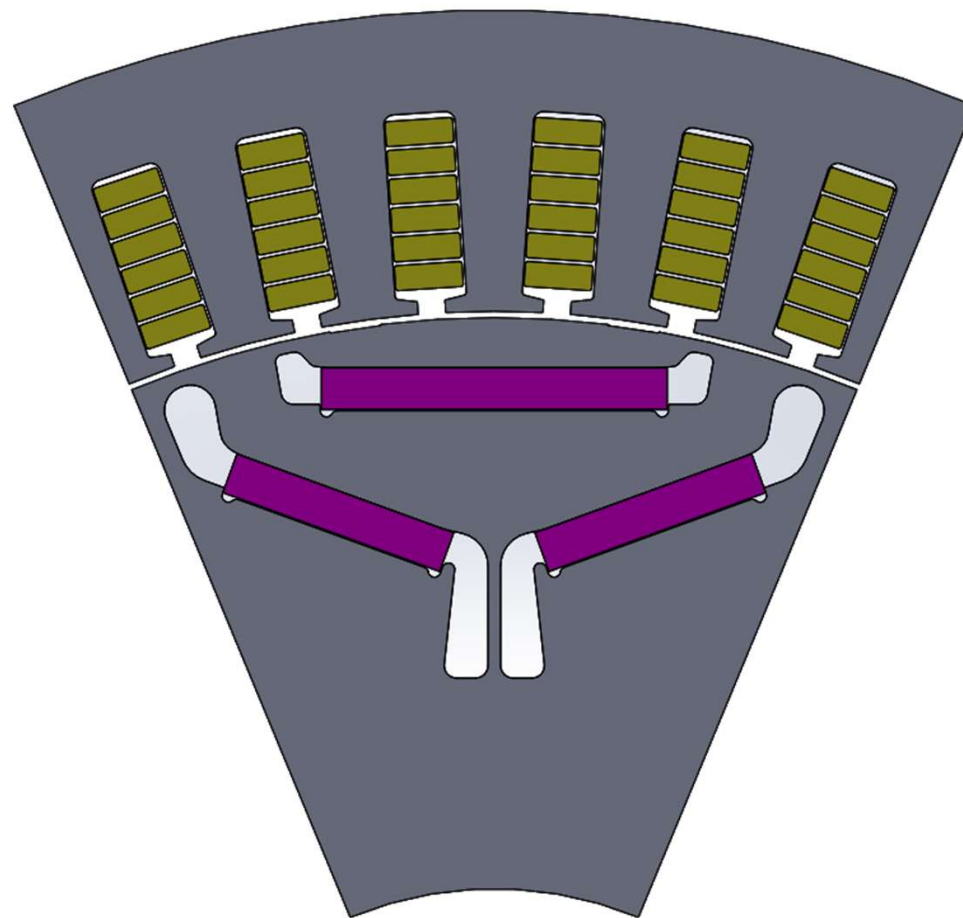
### ①输入约束条件

⇒ 构成形状的元素很复杂

- 参数数量
- 约束条件的复杂度增大

### ②分析时间

⇒ 随着参数数量的增加  
分析时间增加



## 电机设计问题的设置（例）

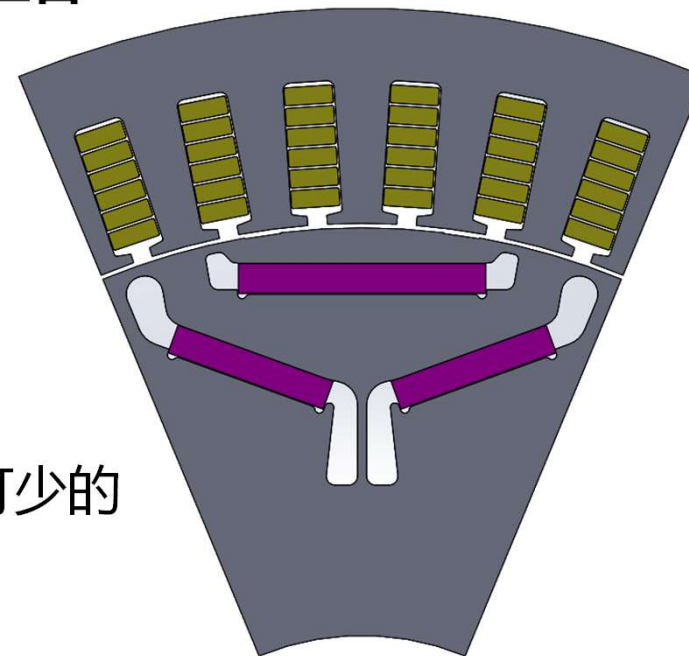
- 【目的】
  - 磁钢（成本）      最小
  - 尺寸      最小      ⇒    扭矩和输出      最大
  - 效率      最大

⇒ 磁钢，空气，电磁钢板的最佳组合

- 【目标】

在尽可能大参数组合范围内  
找到最优解
- 【前提条件】

应力（离心力强度）与磁场的耦合时必不可少的  
⇒ 电磁场和应力的模型是通用的



## 产生的问题

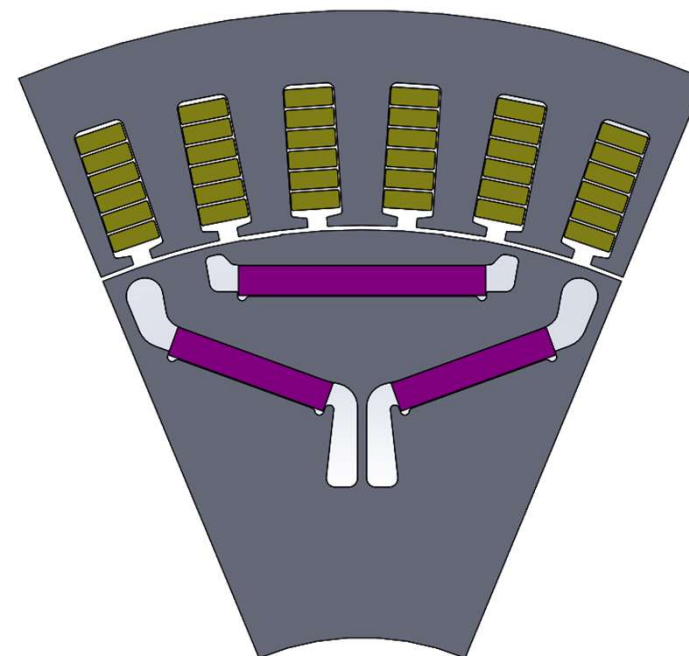
- 【增加参数的数量】
  - 由于形状复杂（磁铁/空隙）而增加了设计元素
  - 增加R来确保强度
    - ⇒ 常用模型（用磁场、应力为模型很难进行管理）

结果 . . .

- ◆ 不可能由设计师进行手工分析处理
  - ⇒ **优化软件诞生**

但问题是 . . .

- ◆ 当形状太复杂时，改变参数会导致形状错误，无法解析
  - ⇒ **输入约束条件的问题**

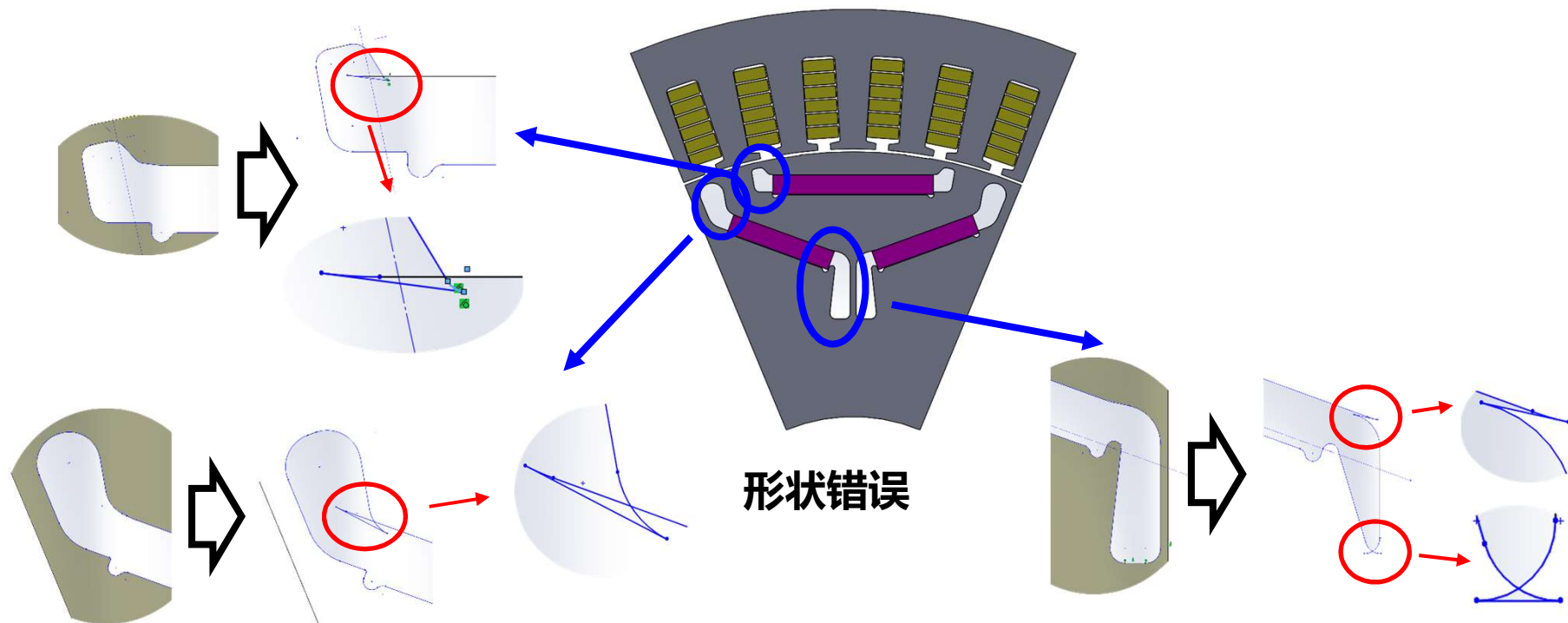


## 什么是输入约束条件？

- 更改参数只会导致形状错误  
找不到任何可以分析的模型

⇒ 存在的各个参数在一定范围相互依存

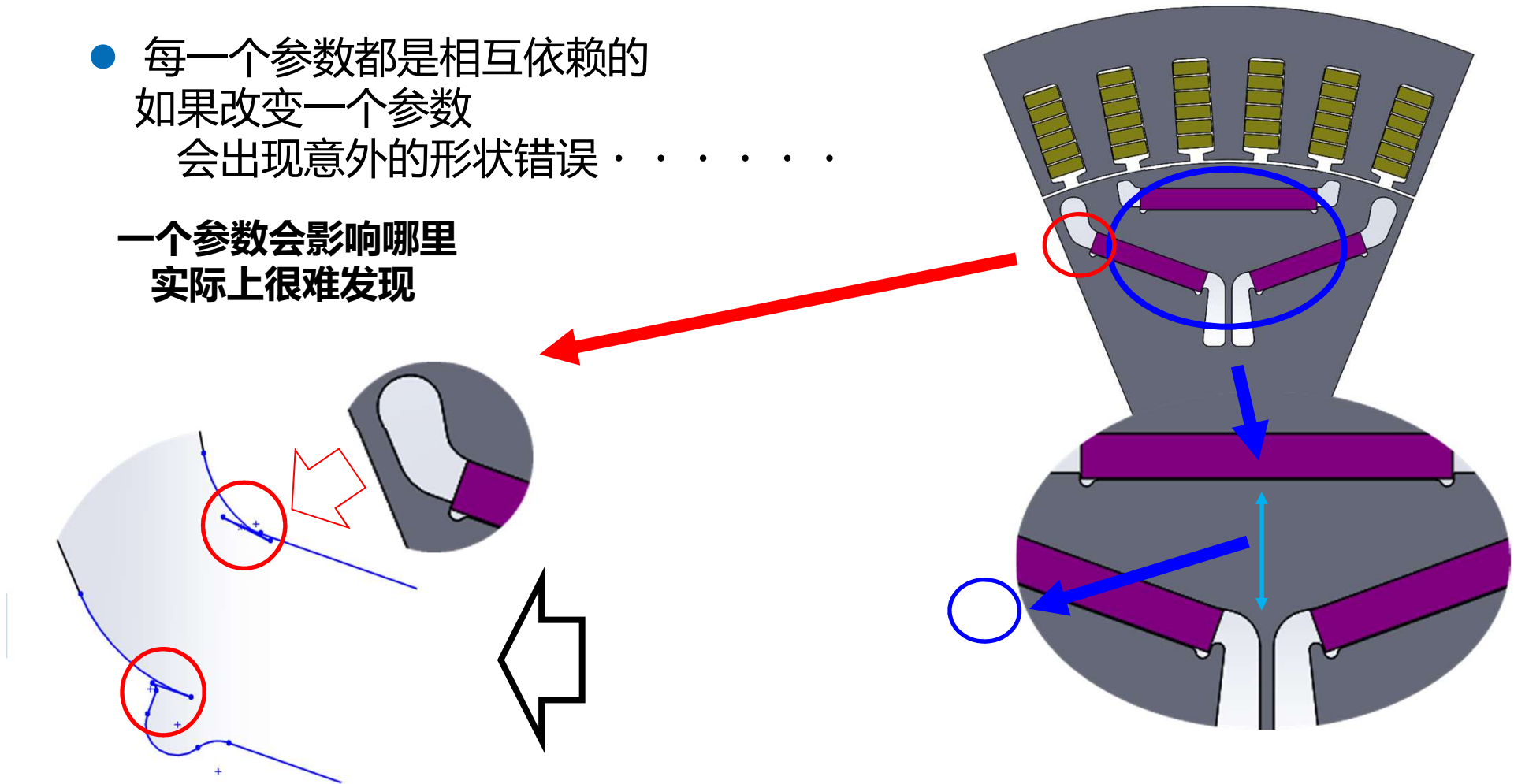
※在随机取样中，  
通常没有可解析的形状



## 什么是输入约束条件？

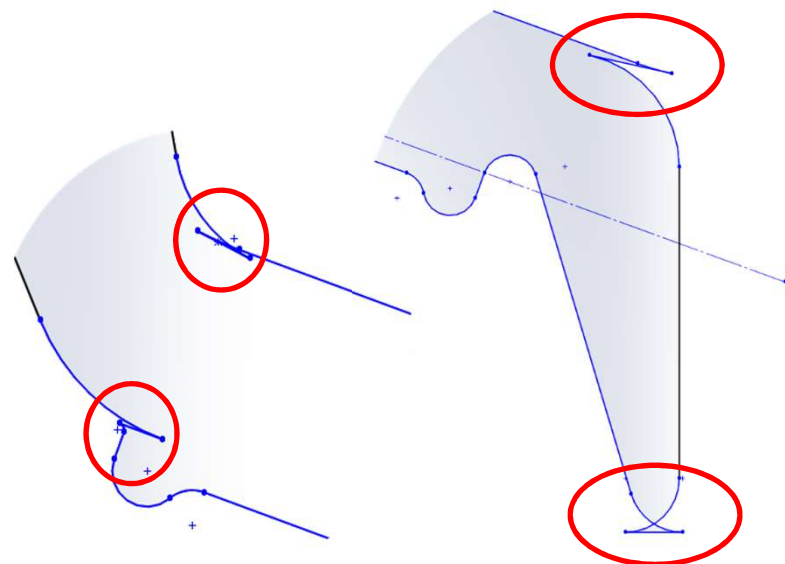
- 每一个参数都是相互依赖的  
如果改变一个参数  
会出现意外的形状错误 . . . . .

一个参数会影响哪里  
实际上很难发现



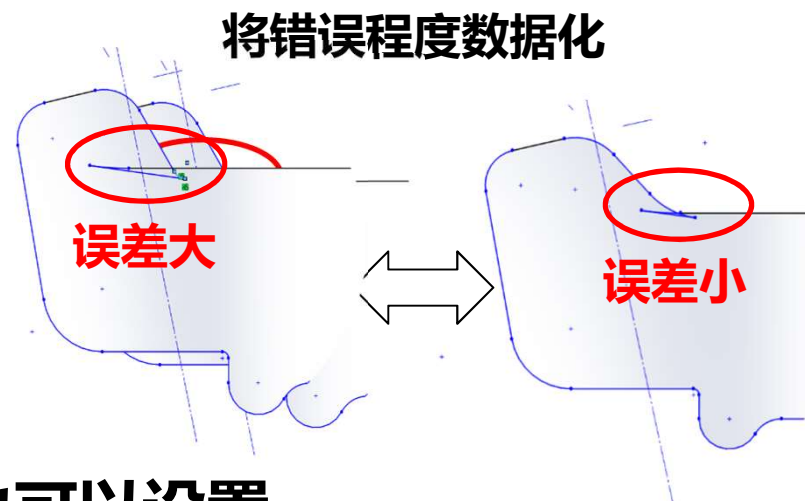
## 输入约束条件问题的解决方法

- 从CAD几何自动提取约束条件  
约束的问题可以通过几何  
的方法解决  
(特殊事例需手动设定)
- 数值化引起形状错误的程度



定制软件开发  
⇒ 制约 (约束条件)  
简化了设定

用曲面判断约束条件  
(优化算法)  
⇒ 自我学习约束



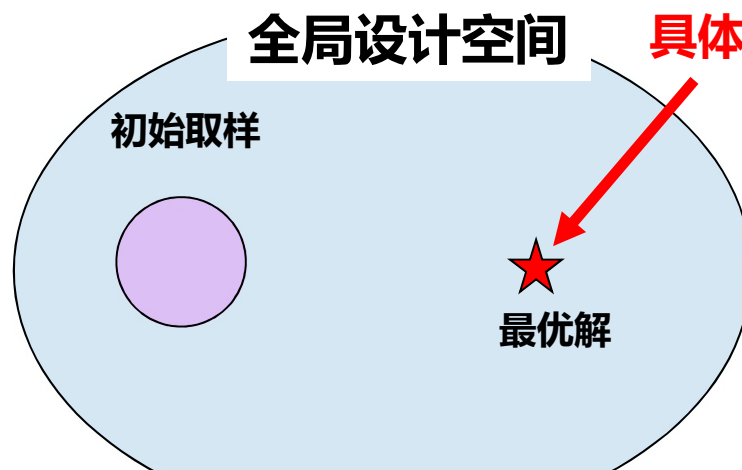
即使在短时间内复杂的形状约束也可以设置 . . .

## 初期取样的重要性

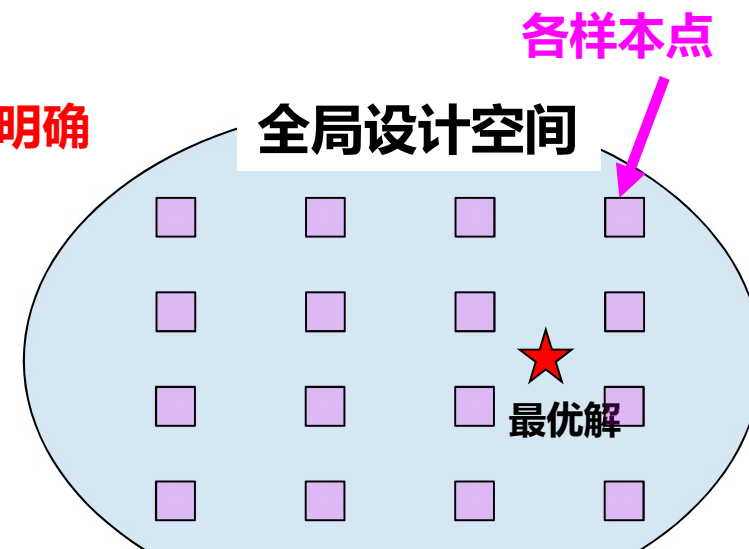
- 调度器的初始取样非常重要  
⇒ 用最少的取样来表现想要探索的设计空间

设计空间：想要搜索的所有参数的范围

⇒ 电机的各形状参数的上下限



早期在采样很小的区域  
很难找到最佳解



将设计空间广泛囊括的  
初期取样

早期样本左右了搜索效率

※样本点  
⇒ 满足形状成立的各参数组合

## 电机形状优化的前期准备

- 输入约束条件 ⇒ 可以用定制的软件来输入  
有效率的设定（部分手动设定）
- 初期取样定义 ⇒ **为掌握设计空间而实施多目标优化**  
（判断形状是否成立）

### 优化目标函数

函数：A ⇒ **最大化 · 最小化**

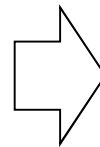
函数：B ⇒ **最大化 · 最小化**

· · ·

· · ·

· · ·

**（全参数）**



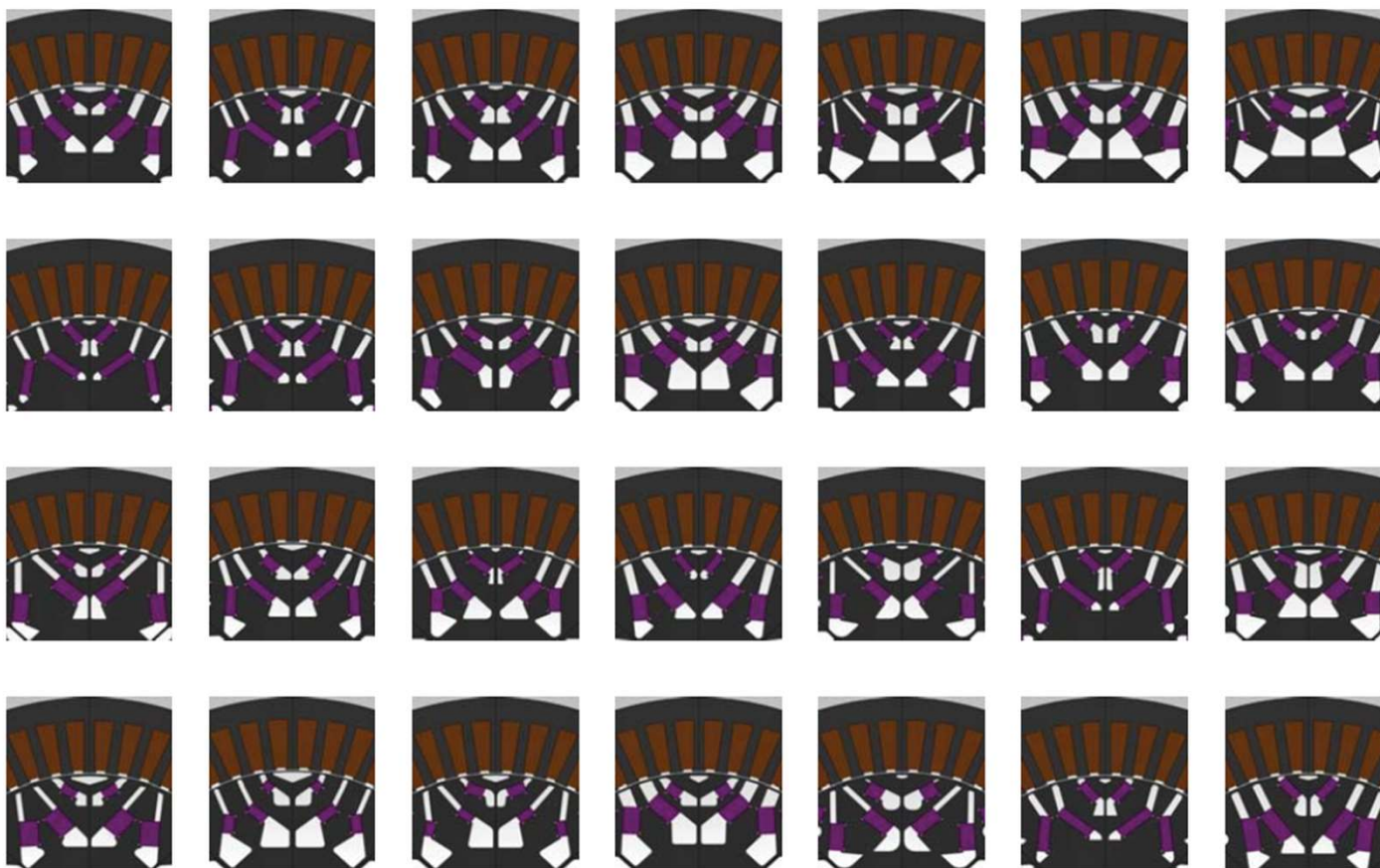
**满足以下条件的多目标优化  
通过算法优化**

**例如FAST优化算法等**

- 通过响应面判断约束条件是否成立  
（或者同等的性能）
- 探索各种最佳解决方案

## 电机形状优化的前期准备

- 实施结果 ⇒ 通过modefrontier发现各种各样的形状

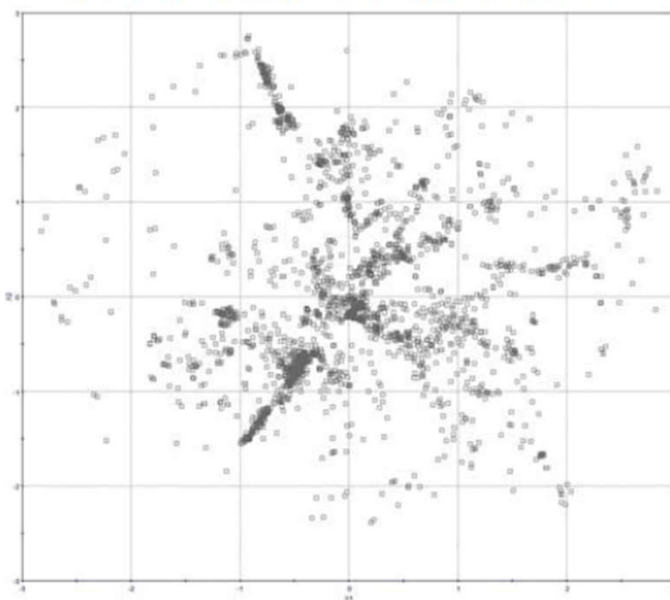


## 电机形状优化的前期准备

- 初期取样

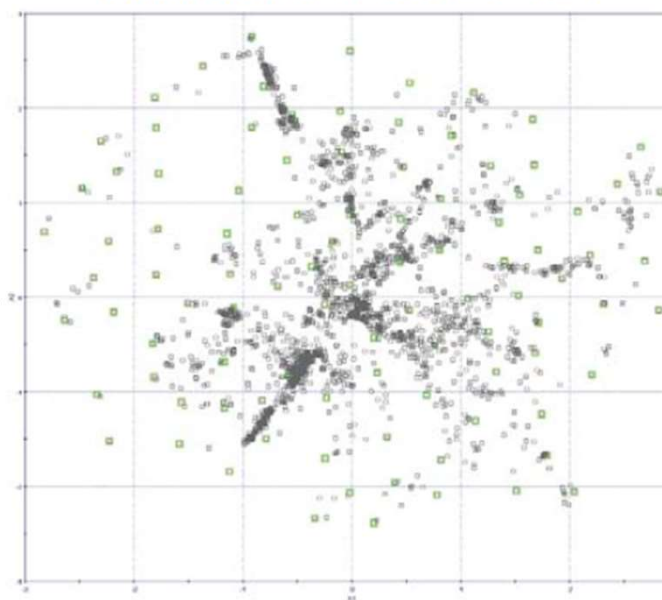
用两种多元分析方法

多次元尺度構成法による低次元化



在约束条件中  
得到了足够的取样数据  
⇒ **可以期待全局最优解**

均等間引き法によるサンプリング



※ 将多个参数进行低维化的结果，参数成立条件只存在于有限的空间里

□ 提取数据

## 优化实施

- 解析时间缩短  
每一个参数都计算一次      ⇒    需要大量的时间

通过以下操作缩短时间

- ◆ 通过区分问题来实施优化
- ◆ 尽可能的并行化

## 优化实施

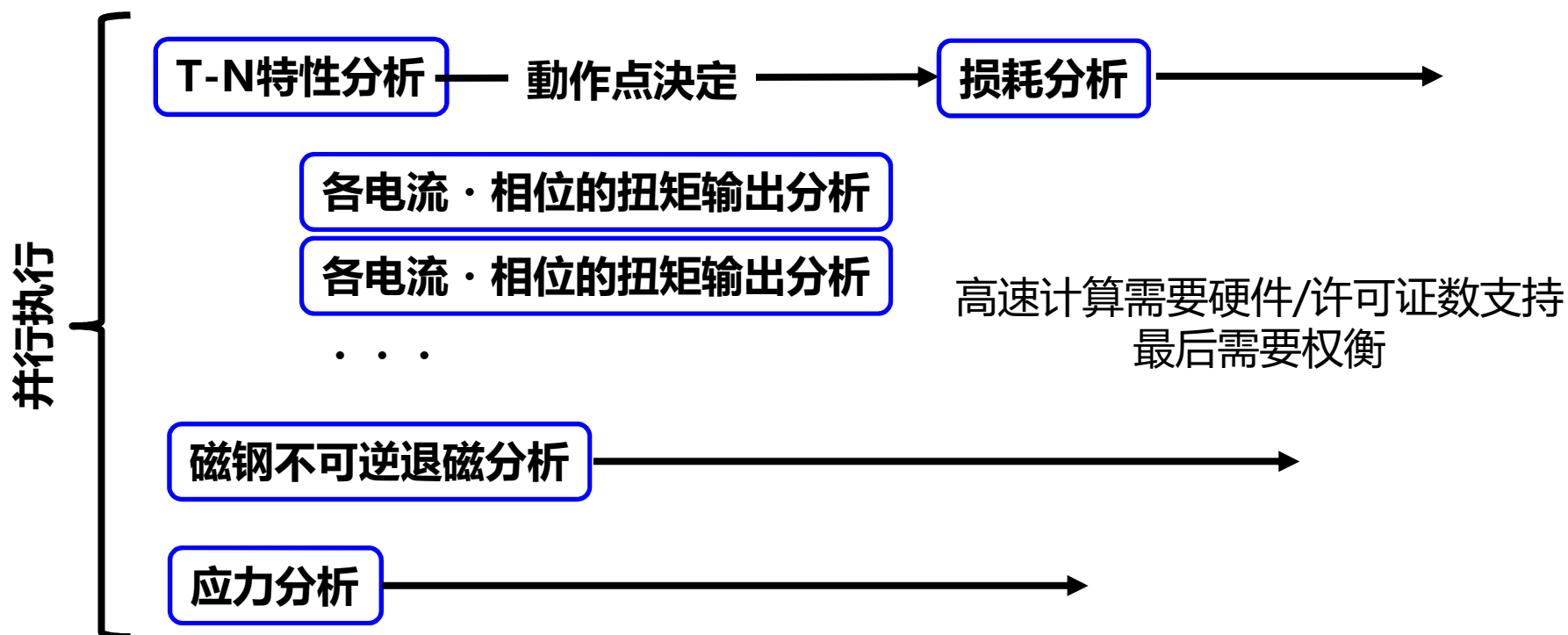
- 区分问题，优化实施  
仔细考虑实际问题，选择合适的参数 . . .
  - ◆ 匝数      ⇒ 只需改变电机匝数, 就能显著改变特性  
              → 通过初步检查，将变化的匝数设为定值
  - ◆ 磁钢退磁 ⇒ 耦合和冷却采用三维磁钢涡流损耗分析  
              → 预先规定最大磁铁温度
  - ◆ 铁损      ⇒ 需要很多分析步骤  
              → 从动作规范中寻求重心，在动作状态下进行分析  
                  ( 需要从过去的认识开始 )

从范围广泛的电动机形状优化中限制适当的尺寸、会导致丢失参数的可能性，  
在此之后实施精细的调优

⇒ 从最大允许的计算时间中做权衡

## 优化实施

- 执行并行分析  
可以并行分析的内容，尽可能的采用并行 . . .

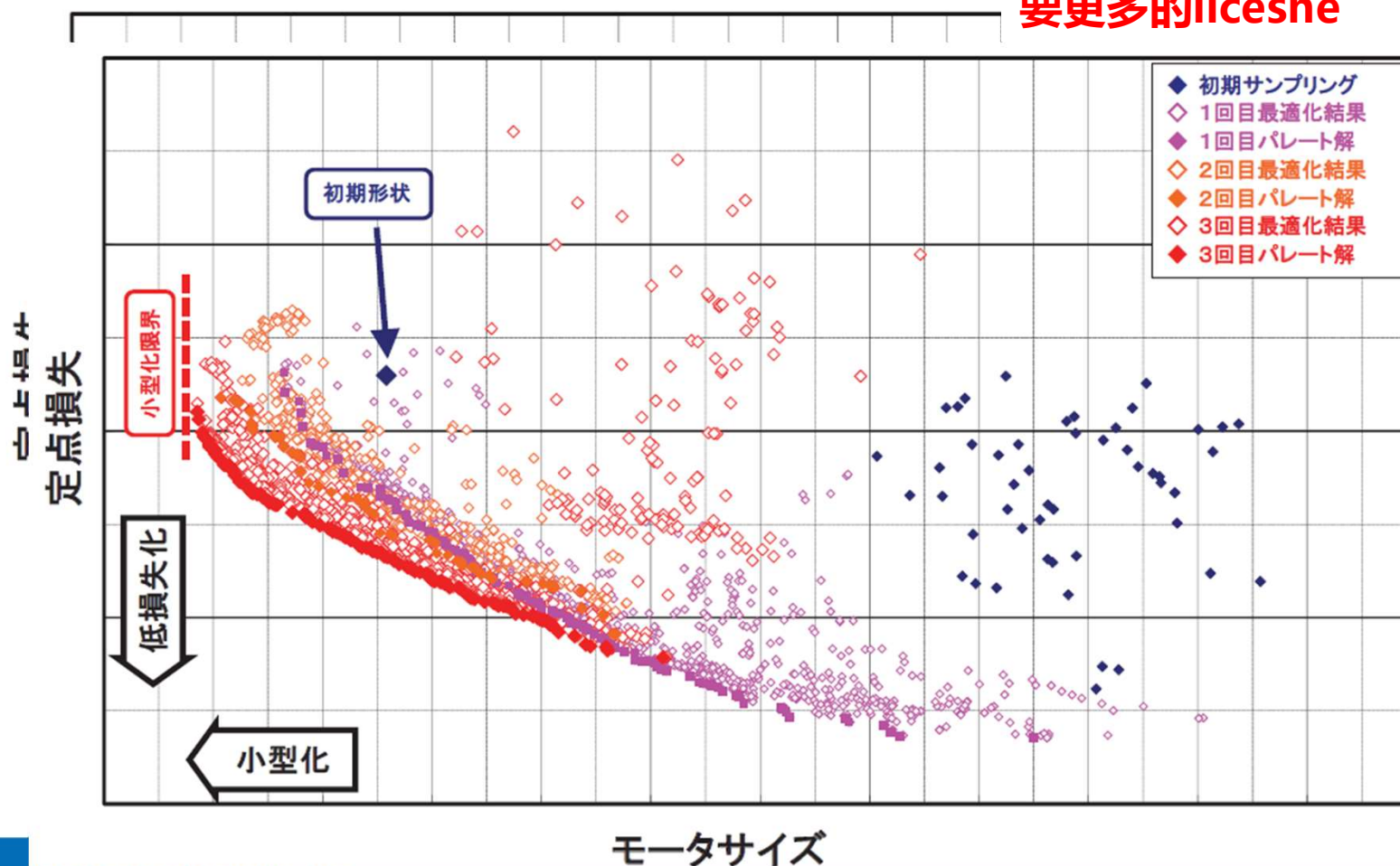


需注意到的瓶颈 (大部分时间都很长)

## 优化结果

- 2014 JMAG Conference 案例结果

約30日の計算時間  
課題：为了缩短计算时间，需要更多的license



## 最后总结

- 在以下所有适用的例子中，这样的大规模优化的效果似乎很小。
  - ◆ 相对简单的形状
  - ◆ 参数数目减少
  - ◆ 磁场计算不与应力耦合
- ⇒ 设计人员非常喜欢的对象，适用于包含复杂形状的应用程序不能对应的情况下，效果很大

设计师有责任推导出这样的马达形状。

- 在这样的环境下，优化可以发挥巨大的效果。
  - 耗时的优化设计是自动化的
  - 设计人员想集中精力在新的概念设计上

谢谢大家的倾听